

渤海海峡区域地壳稳定性评价*

刘忠亚^{1,2} 赵铁虎^{2†} 彭轩明³

(1 中国地质科学院研究生部,北京 100037)

(2 国土资源部青岛海洋地质研究所,山东 青岛 266100)

(3 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所,河北 廊坊 065000)

摘要 区域地壳稳定性评价在我国主要作为工程建设的决策和规划的重要参考。这一方法是在我国的大型工程的建设活动中得到了广泛地应用,其应用范围包括大坝、核电站的决策和选址以及城市规划、铁路、隧道等工程的建设等。近年来,随着工程活动规模的扩大,对区域地壳稳定性评价也提出了新的要求:一是需要更加贴近工程实践,实现由场地评价向地质工程设计的转变;二是需要将评价区域由传统的陆地区域扩展到海域。本文即是一次进行海域工程区域地壳稳定性评价的尝试,利用所采集到的渤海海峡及邻区最新的GPS数据、重磁场数据、高分辨率地震数据和地应力数据等资料,对该区域的断裂活动性、地震活动性、地形变特征、地球物理场和地应力特征等方面进行综合分析,采用基于层次分析法的模糊综合评价方法,按照稳定、较稳定、较不稳定、不稳定四个等级,将渤海海峡跨海通道工程区划分为1600个5 km×5 km的评价小区域进行了区域地壳稳定性评价。结果表明,在1600个评价区中,稳定区和较稳定区较少,分别为204个和141个,主要集中在北黄海区域;而研究区大部分区域处于较不稳定和不稳定状态,其数量分别为775和480个,且主要位于渤海南部和渤海海峡南部,这明显是因为受到了NNE向郯庐断裂和NW向张家口蓬莱断裂的影响。这种评价结果对即将开展的渤海海峡跨海通道工程的规划和建设是十分不利的,需要采用更加详细的工程地质调查手段对这一区域进行进一步的调查和研究。

关键词 渤海海峡;区域地壳稳定性;断裂活动性;地震活动性;模糊综合评价

区域地壳稳定性评价是在中国独立发展起来的一门工程地质学分支学科,属于区域工程地质学的工作内容^[1],其在我国的发展主要经历了三个阶段:50年代到60年代末期,“区域地壳稳定性”的概念初步被提出,但处于单层次现象描述的定性评价阶段,这属于区域地壳稳定性评价的萌芽阶段;60年代末期到80年代末期,区域稳定性工程地质学从单层次现象描述进入多因素分析的阶段,这属于区域地壳稳定性评价的发展阶段;80年代末期以后,区域地壳稳定性评价理论走向成熟化、半定量化、智能化和专家化,这属于区域地壳稳定性评价的成熟阶段。在成熟阶段,随着区域地壳稳定性评价广泛地应用到工程实践中,形成了三种关于区域地壳稳定性的不同的学术观点:以刘国昌为代表的区域地

壳稳定性工程地质学理论,以谷德振为代表的构造控制论和以胡海涛等人为代表的“安全岛”理论。区域地壳稳定性工程地质学理论将区域地壳稳定性评价划分为3个层次,即构造稳定性评价、地面稳定性评价和场地稳定性评价,认为地球内动力地质作用是影响区域地壳稳定性的主导因素,但又同时考虑到外动力地质作用和特殊物理地质现象对地面稳定性和场地稳定性的影响^[2]。构造控制论强调控制区域地壳稳定性的主要因素是岩土体结构和构造活动,其主要研究思路是对断裂活动性、地震活动性和断块稳定性进行分析和评价^[2]。“安全岛”理论则认为,区域地壳稳定性是指在工程建筑地区,在内、外动力(以内动力为主)的作用下,现今地壳及表层的稳定程度,以及这种稳定程度与工程建筑之

收稿日期:2015-05-28

* 国家海洋地质专项工作项目(GZH201200504)资助

† 通讯作者;E-mail: Zhao-tiehu@163.com

作者简介:刘忠亚(1991—),男,教授,主要从事地质灾害方面的研究。E-mail: liuzhongya1991@126.com

间的相互作用和影响^[3]。该理论最初由李四光提出,而后胡海涛、殷跃平等继承和发展了该理论。

从20世纪90年代起,涌现出一系列关于区域地壳稳定性的专著和创造性理论,如《区域稳定工程地质》、《区域地壳稳定性研究理论与方法》、《区域地壳稳定性量化评价》、《区域稳定动力学》等。殷跃平^[4]首次提出了区域地壳稳定性评价的专家知识结构模型;刘传正^[5]提出了重大工程选址的“安全岛”多级逼近与优选理论体系和工作步骤;罗国煜等^[6]提出区域地壳稳定性分析优势面理论;孙叶等^[7]利用模糊综合评判法对整个中国的区域地壳稳定性做出了量化评价,并给出了中国区域地壳稳定性分析略图。汪明武^[8]结合4“S”技术与地质工程技术对区域地壳稳定性智能评价与控制系统进行了探讨;彭建兵^[9-10]将大陆动力学理论与区域地壳稳定性结合起来,以动态角度、圈层结构角度研究区域地壳稳定性,给出了研究区域地壳稳定性的新思路;“5·12”汶川地震之后,谭成轩等^[2]指出区域地壳稳定性评价应向小区划和四维发展,并呼吁编制中华人民共和国国家标准即区域地壳稳定性评价规范;文献[11-12]认为传统的区域地壳稳定性评价工作思路和理论已不能满足目前工作的需要,提出区域地壳稳定性评价需构建基于地质力学和大陆动力学理论相互补充的工程区域稳定性评价体系;姚鑫等^[13]编制了第一部区域地壳稳定性工作的规范—《活动断裂与区域地壳稳定性调查评价规范(1:50000-1:250000)》。

此外,随着近年来经济和技术的快速发展,工程活动的规模越来越大,这也对区域地壳稳定性评价研究提出了新的要求:第一,评价目标需要更加贴近工程实践。有些稳定性较差的场地无法避开,所以现今的地壳稳定性评价不再是单纯的选择场地,而是要求查明场地不稳定的主要因素,在此基础上指导工程在建设过程中对场地进行合理地利用,并提出相应的防灾和减灾措施,逐步实现由场地评价—场地利用—地质工程设计的转变^[14]。第二,评价区域需要从陆地扩展到海域。随着工程科技的发展和建设的需要,建设涉海工程的需求也越来越高,比如正在建设中的珠港澳跨海大桥以及规划中的渤海海峡和琼州海峡跨海通道等涉海工程,其规模大、海域地质情况复杂,尤其需要进行详细的区域地壳稳定性评价工作,因此,将区域地壳稳定性评价从传统的陆地扩展到海洋也是非常重要的。

渤海是延伸进入我国大陆的内海,被辽宁、河北、山东、北京和天津等省市所环绕,这些地区占据了我国近1/9的面积、1/5的人口和1/4的城市。由于受渤海海峡阻隔,环渤海南北两岸成为交通“死角”,极大地限制了客货交流和经济往来。多年来,就一直有着建设渤海海峡跨海通道的设想,不同的专家、学者们已经不断地从地质、地理、经济、政治、交通等方面对这一工程进行可行性研究的探讨,并对跨海通道的具体方案进行了初步的设计^[-15-17]。但是由于渤海海峡及邻区地质条件特别复杂,构造活动活跃,且地震尤其是强震多发,对该地区跨海通道的建设极为不利。本文试图通过对渤海海峡跨海通道工程区域内断裂活动性、地震活动性、地形变特征、地球物理场和地应力特征等资料的综合分析,探究渤海海峡地区的构造活动性,在此基础上采用模糊综合评价的方法对研究区的地区稳定性进行评价,以期对渤海海峡跨海通道的选址和建设提供基础地质依据。

1 区域地壳稳定性分析

1.1 研究区位置及区域地质背景

研究区位于37.0°N~39.5°N,119.0°E~122.2°E之间,覆盖了整个渤海海峡区域,处于渤海和北黄海的中间地带,为一个200 km×200 km的矩形区域,其以渤海海峡中轴线中点为中心点,该点至矩形四个边界的垂直距离均为100 km。此外,为了对研究区进行稳定性评价,本文采用均匀网格法进行单元划分,将研究区划分为1600个单元网格,每个单元网格的大小为5 km×5 km(图1)。

在构造位置上,研究区位于华北板块的东北部。华北板块新生代以来的构造演化主要受到印度板块与欧亚板块的碰撞以及太平洋板块向欧亚板块下的俯冲这两种远场构造应力的影响^[18],受这三大板块的相互作用,华北板块东部的深部软流圈物质在俯冲界面的两侧上涌,形成地幔热柱,从而导致了华北板块整体的裂陷作用和众多裂陷盆地的形成,正是在这种背景下,研究区内发育了复杂的构造环境和活跃的断裂、地震活动。

研究区内地层大致可以分为上下两层,其中上部为新生代的新近系和第四系,而下部为上元古界“蓬莱群”地层,为一套浅变质岩系^[15]。第四系在多数岛屿及海底均有分布,其厚度可能达到30 m左

右,按成因可分为残积层、坡积—洪积层、海积层等,新近系则主要为两期火山喷发的玄武岩;上元古界“蓬莱群”则主要包括两组地层:一是豹山口组绢

云千枚岩和石英岩,二是辅子乔组板岩与石英岩互层,这两组地层主要分布于渤海海峡内的岛屿之上。

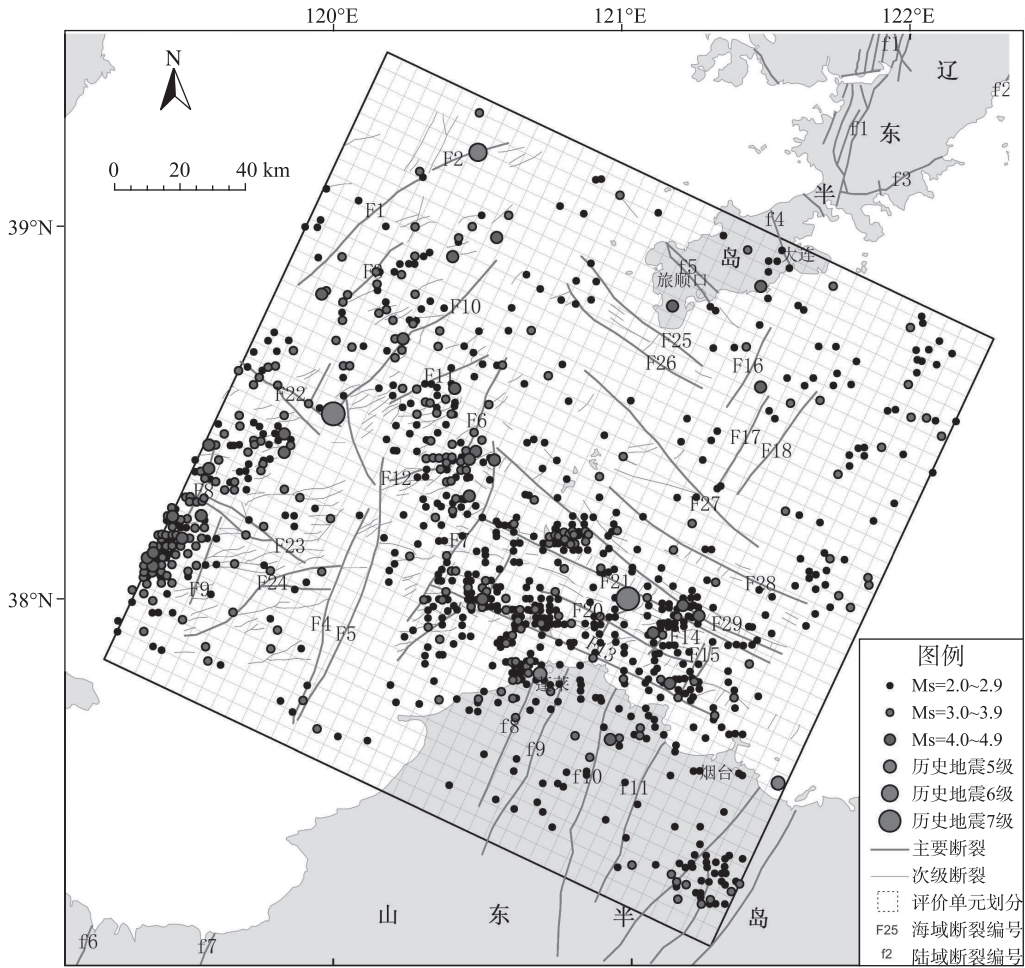


图1 研究区位置、评价单元划分及断裂和地震活动分布图

Fig.1 The map of researched area location, evaluation unit division and distribution of faults and seismic active

1.2 断裂活动性特征

对渤海海峡及邻区的高分辨率地震剖面资料(由青岛海洋地质研究所于2013年海洋地质调查中获得)进行解译,识别研究区主要活动断裂。系统收集研究区历史和现代地震资料(5.0级以上强震数据源自中国历史地震目录,5.0级以下地震数据源自中国地震台网中心1970—2013年地震目录),编制出研究区活动断裂和地震活动分布图(图1),探究活动断裂展布特征及其与地震活动的关系。

地震剖面揭示研究区主要发育有NW、NE—NNE两组断裂,以F6为界大致将研究区分为东、西两部分。研究区的西侧属于渤海湾盆地的研究范围,此区域内NW向断裂(F22,F23)为张家口—蓬

莱断裂带的渤海段^[19];NE—NNE向断裂均属于营口—潍坊断裂带的一部分,F1~F3,F10~F12以及F6属于营口—潍坊断裂带的渤中段,F4~F5,F8~F9则分别属于营口—潍坊断裂带的莱州湾段的東西两支^[20]。这些断裂形成的时间较长,在中—晚元古代就已经初具雏形,从中生代到新生代,其活动性一直在加强^[21]。研究区的东侧则属于渤海海峡的范围,此区域内NW向断裂(F19~F21,F25~F29)大致呈等间距左阶分布,连续性较好,其中F19~F21推测是张家口—蓬莱断裂带在渤海海峡内的主要断裂,NE—NNE向断裂被NW向断裂切割成三个部分:f8~f11为陆域断裂,属于栖霞—蓬莱断裂带;F13~F15可能是栖霞—蓬莱断裂带在海域的延伸部分,与张家口—蓬莱断裂带在胶东半岛近海相

互切割,长度较短,形态破碎;F16 ~ F18 可能向北与辽东半岛的金州断裂相连。这些断裂中,除了郯庐断裂营淮段的東西两支,即 F8 ~ F9 和 F4 ~ F5 均为全新世活动断裂以及栖霞—蓬莱断裂带中 f10, f11 为早—中更新世活动断裂外,其余断裂均为晚更新世活动断裂^[22]。

1.3 地震活动性特征

渤海海峡及邻区的地震活动性特征表明:研究区内地震分布并不均匀,具有南密北疏的特点,且在 NE-NNE 向断裂和 NW 向断裂的交点和端点处密集分布,尤其是在南部胶东半岛北部近海海域以及营淮断裂莱州湾段西支附近海域,由于两组断裂在较短的间隔内相互切割,地震分布格外密集;而在与之相邻的营淮断裂莱州湾段东支及研究区北部的辽东半岛附近海域,两组断裂未见明显交汇,地震分布较为稀疏。对研究区内断裂周边各级地震数量的进一步统计表明,地震于断裂周边形成密集带,且随着与断裂之间距离的增加,地震在每公里内的数量呈现非线性递减趋势,同时震级也呈下降趋势,其中 50% 以上中、小震和 5.0 级以上地震全部分布在断

裂周边 5 km 范围内,80% 的地震集中在断裂周边 10 km 范围内。此外,在断裂的特殊点位如交点和端点处地震分布也有集中的趋势,且中强震更容易发生在断裂的端点和交点附近。综上所述,渤海地区地震活动表现出成带性和分段性以及空间上的不均匀分布的特征^[23]。

根据研究区内断裂分布,并综合渤海地区对渤海海峡跨海通道工程区烈度影响较大的几次历史地震,如 1548 年蓬莱地震、1888 年渤海湾 7.5 级地震和 1969 年渤海 7.4 级地震等,绘制出研究区综合等震线图(图 2a),并通过计算给出研究区内 50 年超越概率为 2% 的基岩峰值加速度(图 2b)。历史地震综合等震线表明,研究区受到历史地震的影响较大,北部辽东半岛附近历史地震烈度为Ⅵ度,其余大部分区域烈度为Ⅶ度或Ⅷ度,而在山东半岛附近海域甚至达到了Ⅸ度;研究区地震峰值加速度总体呈西高东低的趋势,其最大值位于渤中凹陷处,大致呈圆形分布,向四周逐渐减小,但是在渤海海峡附近呈舌状突起突入黄海海中,其在山东半岛内部及辽东半岛东部海域最小。

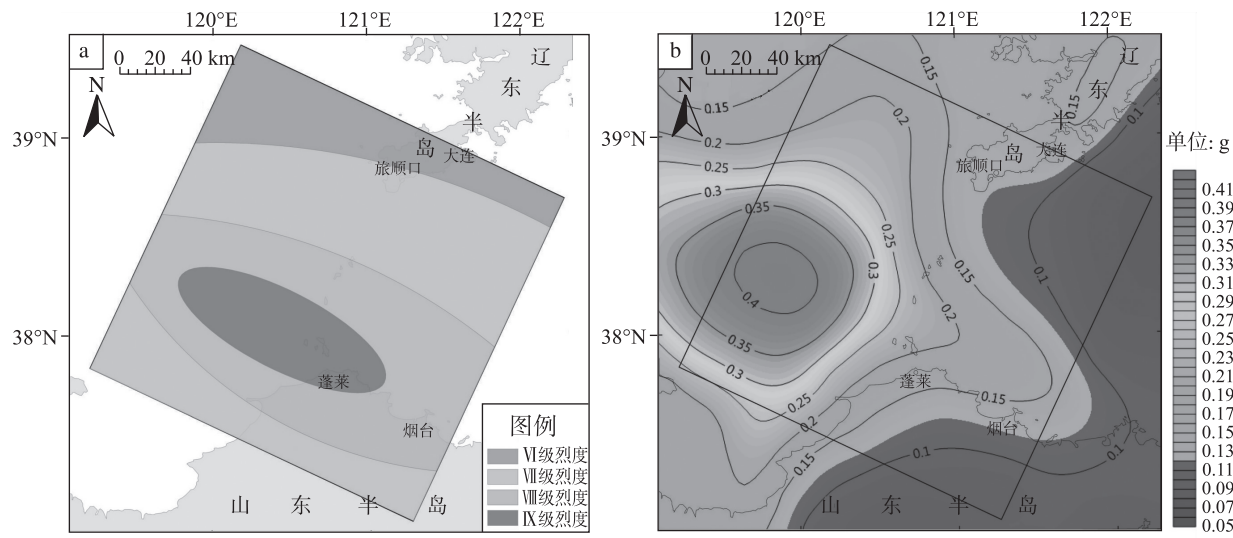


图 2 研究区地震活动性特征(图 b 数据来源于中国地震局地壳应力研究所,2015)

Fig. 2 Characteristics of seismic activity in theresearched area

(The data of figure b from: Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, 2015)

1.4 地形变特征

通过对环渤海地区的 GPS 数据进行分析后进行插值(其中水平形变 GPS 数据来源于青岛海洋地质研究所,垂直形变 GPS 数据来源于文献^[24]),最后得出全区的水平形变速率和垂直形变速率,见图 3。结果表明,渤海内部大致由 NW 向 SE 向运动,

由研究区北部向南,其方向逐渐发生变化,最后大致变为 EW 向运动;在运动速率上,南部胶东半岛及其附近海域的平均运动速率为 10 mm a^{-1} ,逐渐向北,到辽东半岛附近变为 4 mm a^{-1} ,反映了该区域水平运动速率由南向北的递减。垂直活动速率特征则反映了渤海海峡及邻区由凹陷向隆起的转变:渤中凹陷附

近垂直活动速率为负值,且最大值超过 -20 mm a^{-1} ,而大致沿着郯庐断裂营潍段东支,垂直活动速率

变为正值,这与研究区及邻区的构造单元划分相一致。

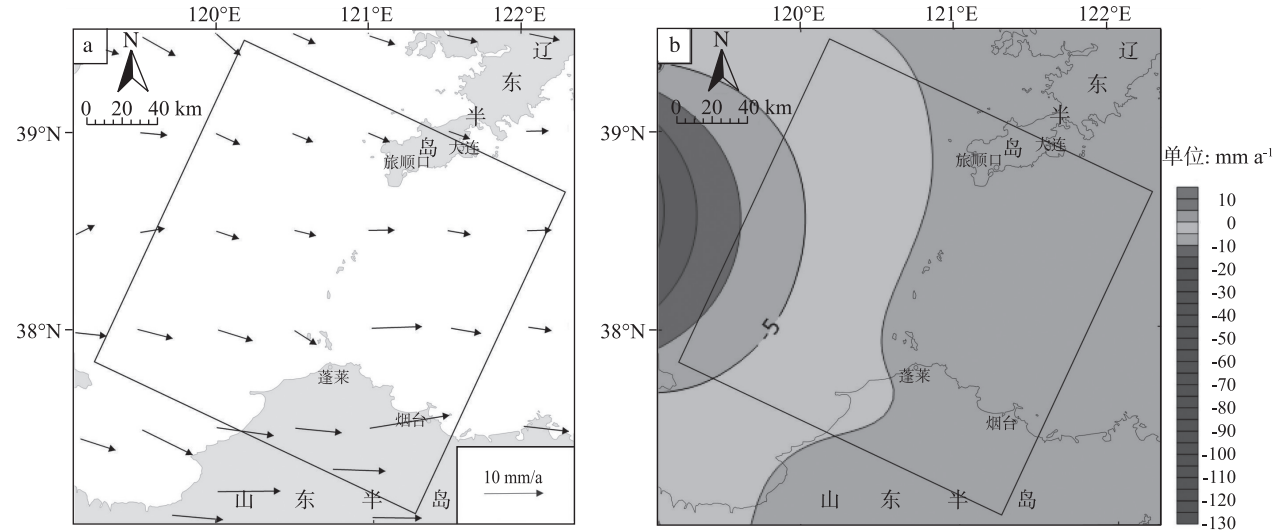


图3 研究区地形变形特征

Fig.3 Crustal deformation characteristics of the researched area

1.5 地球物理场特征

研究区及邻区的空间重力异常总体表现出西低东高的特征,且其空间重力异常等值线(图4a)的整体形态与前文中所划分的构造单元的边界基本一致,以郯庐断裂营潍段东支和张家口—蓬莱断裂渤海段为界,将研究区及邻区划分为四个部分。其中东部即I、II区重力异常值较低,尤其是I区,全为负异常值,该区域在构造单元划分中属于辽东湾凹陷和渤中凹陷,区域II则为负异常和正异常相间分布,在构造区划中属于济阳凹陷的一部分,这两个区域的重力异常的变化趋势为由北向南逐渐降低;而

西部,即区域III、IV则表现出正的重力异常,这两个部分在构造区划中均属于胶辽隆起带的一部分,但是从南向北,即由区域III向区域IV,其重力异常的正异常值有增加的趋势。此外,值得注意的是,在辽东半岛及其附近海域,不仅重力异常值比较高,而且其坡度变化也十分剧烈,从图4a可以看出,重力异常变化迅速的坡度带大致呈现NE和NW向分布,反映这一区域受到NE向和NW向构造的影响。

研究区磁异常整体上表现出西高东低的特征,由郯庐断裂营潍段东支和张家口—蓬莱断裂渤海段把这一区域划分为四个子区域(图4b),且这些区域

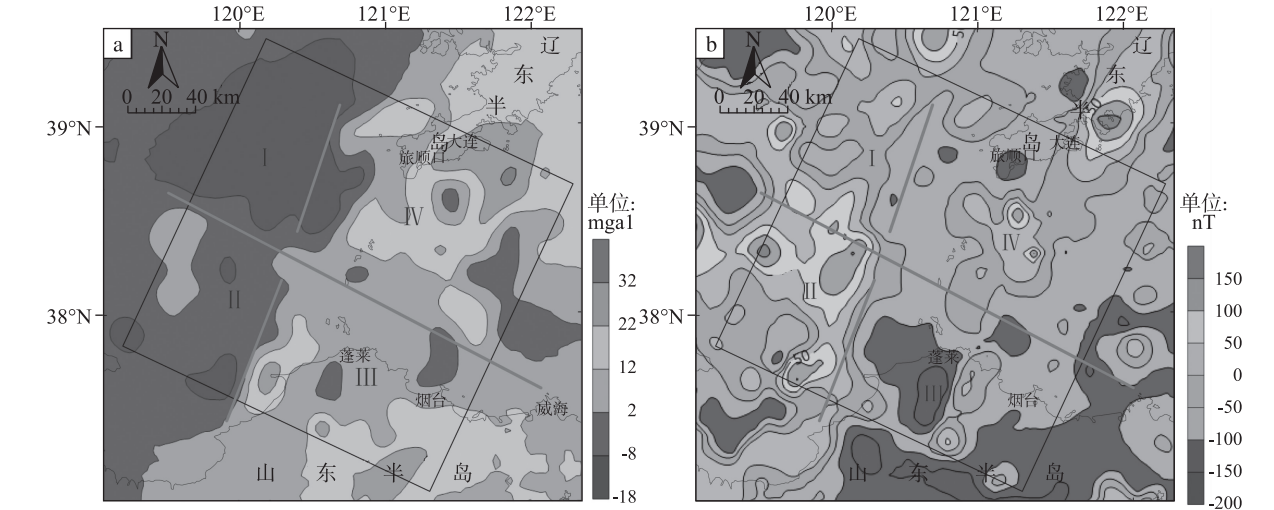


图4 研究区及邻区重力异常及磁异常(数据来源于青岛海洋地质研究所)

Fig.4 Gravity anomaly and magnetic anomaly characteristics of the researched area and adjacent areas

(The data from Qingdao Institute of Marine Geology)

的磁异常特征与空间重力异常特征正好相反,但是变化趋势是相同的:西部区域,即Ⅰ,Ⅱ区的磁异常值较大,主要为正异常,由南向北异常值逐渐降低;而东部区域,即Ⅲ,Ⅳ区的磁异常值较低,其变化趋势为由南向北逐渐增加。此外,图4b反映出辽东半岛及其附近海域和渤海凹陷处(即区域Ⅱ,Ⅳ)磁异常的变化相对比较剧烈,其变化剧烈的坡度带大致以NE和NW两个方向为主,这反映出这两个区域可能受到NE向和NW向构造的影响比较大。

1.6 地应力特征

利用有限元法对研究区进行数值模拟,模拟时采用的模型单元为通用有限元模拟软件ANSYS中的PLANE183单元,该单元为包含中间节点的8节点平面应力单元,网格单元尺寸为2 km,所建立的模型中将断层周围围岩的杨氏模量取为 5×10^9 Pa,模型中所有断层处理为接触摩擦单元,断层杨氏模量取周围介质的1/3,泊松比较周围介质稍大,摩擦系数取0.4。经过计算后得到该区域的最大主应力及方向分布图(图5)。

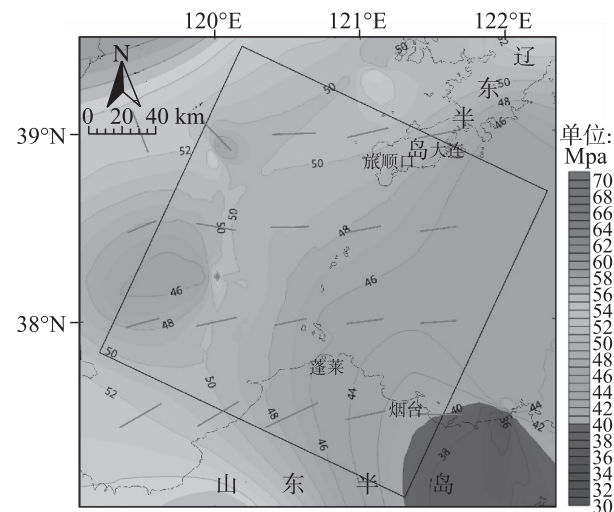


图5 研究区及邻区最大主应力及方向分布图

(数据来源于中国地震局地壳应力研究所,2015)

Fig. 5 The maximum principal stress and the direction of the maximum principal stress distribution in the Bohai Straits and its adjacent areas (The data from: Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, 2015)

通过对最大主应力值的分析发现,应力值的分布变化较为剧烈,在某些点位处表现出较为明显的应力集中的情况,这可能与位于研究区中断裂的端部、交汇处及拐点处有关。而最大主应力方向的模拟结果表明,营潍断裂及邻区表现为近EW向水平挤压应力,而张家口—蓬莱断裂以南应力场总体表

现为从西部的NEE向转化为东部的近EW向(图5)。

2 区域稳定性评价

2.1 区域地壳稳定性评价理论

由于在区域地壳稳定性评价中,许多评价指标并不能很好的用定量化语言描述,而只能用定性的语言描述,因此,在进行评价时往往需要引入模糊数学的方法来解决这种无法定量的情况。目前,在区域地壳稳定性评价过程中应用较广的模糊评价方法主要有两种:一是模糊综合评价法,二是模糊聚类法。其中,模糊综合评价法是一种应用模糊变换原则和最大隶属度原则,考虑与被评价事物相关的各个因素从而进行综合评价的一种数学方法,其计算量相对较小,计算较为简单,且准确度较高。因此,在目前的区域地壳稳定性评价过程中模糊综合评价法应用最为广泛,本文即采用该方法进行计算。其计算过程如下:

1) 确定评价因素集合 $U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_m\}$, 其中, $u_i (i = 1, 2, 3, \dots, m)$ 为评价因素, m 为同一评价层次上单个因素的个数。

2) 确定评价结果集合 $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$, 其中, $v_j (j = 1, 2, 3, \dots, n)$ 是评价结果, n 是元素个数即评价的等级数,在本文中 $n = 4$, $v_1 \sim v_4$ 分别为稳定、较稳定、较不稳定、不稳定,用数学方法表达为

$$V = \{\text{稳定, 较稳定, 较不稳定, 不稳定}\}。$$

3) 确定隶属度矩阵。假设对第 i 个评价因素 u_i 进行单因素评价能够得到一个相对于 v_j 的模糊向量:

$$R_i = (r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, \dots, r_{in}),$$

其中, $i = 1, 2, 3, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots, n; r_{ij}$ 为因素 u_i 具有 v_j 的程度, $0 \leq r_{ij} \leq 1$ 。若对 m 个元素进行了综合评价,其结果是一个 m 行 n 列的矩阵 R 。在本文中,由于评价结果仅有四个等级,则由 m 个元素构成的评价模糊关系矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & r_{m3} & r_{m4} \end{bmatrix}。$$

在这一矩阵中的每一行是对每一个单因素的评价结果,整个矩阵包含了按照评价结果集合 V 对评价因素集合 U 进行评价所获得的全部信息。

4) 确定权重向量 $W = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_n\}$, 其中, W_i 表示评价因素 $u_i (i = 1, 2, 3, \dots, m)$ 的权重, 满足

$$\sum_{i=1}^m w_i = 1, 0 \leq w_i \leq 1.$$

本文在权重的确定过程中主要采用层次分析法。层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 是一种实用的多准则决策方法^[25], 其处理过程主要包括以下三个步骤:

(i) 建立层次结构。通过对复杂问题的分解, 按照各个影响因素之间的相互支配关系将问题划分为递进的层次结构。

(ii) 构造判断矩阵。假设在层次结构中元素 C 为准则, 它对应的下一层元素为 $u_1, u_2, u_3, \dots, u_n$, 每次在 n 个因子中只对两个因子相互比较相对重要性, 因子之间的相对重要性的度量尺度称为标度, 标度的赋值通常通过“1~9 标度法”^[26] 赋值, 表 1 中列出了“1~9 标度”的含义。

表 1 标度的含义
Table 1 The meaning of scale

标度	标度的含义
1	表示两个元素相比, 具有相同的重要性
3	表示两个元素相比, 前者比后者稍重要
5	表示两个元素相比, 前者比后者明显重要
7	表示两个元素相比, 前者比后者强烈重要
9	表示两个元素相比, 前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若元素 i 与 j 重要性之比为 a_{ij} , 那么元素 j 与 i 重要性之比为 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

由 n 个元素对于准则 C 的相对重要性进行比较, 可以组成一个两两比较的判断矩阵 $A, A = (a_{ij})_{n \times n}$, 其中 a_{ij} 表示元素 u_i 和 u_j 对于准则 C 的重要性的标度。在构建完判断矩阵后, 计算其特征根 λ_{\max} , 并利用公式 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, CR = \frac{CI}{RI}$ 计算判断矩阵的一致性, 其中 RI 为平均随机一致性指标, 由查表得到。若 $CR < 0.1$, 则说明矩阵一致性较好, 无需修改, 否则需要继续修改该矩阵。

(iii) 权重计算。将判断矩阵 A 的特征根 λ_{\max} 所对应的特征向量 W 进行归一化, 即得到权重向量。

5) 得到最终评价结果 B 。权重向量 W 与隶属度 R 的合成就是该评价对象的最终评价结果, 即

$$B = W \circ R,$$

其中, r_{ij} 为第 i 种影响因素对于第 j 个评价等级的隶属度, W 为因素集 U 中因素的相对权重集, “ \circ ” 为模糊算子。

2.2 评价指标的选择和评价等级划分

无论是区域地壳稳定性工程地质学理论、构造控制论还是“安全岛”理论, 均认为内动力地质作用是区域地壳稳定性的主导因素。因此, 根据研究区的特点 (海域) 和数据收集情况, 本文主要从内动力地质作用的角度来对研究区的区域地壳稳定性进行评价。内动力因素主要通过深部地球物理场、地震活动、区域构造变形、区域构造应力场等地质环境要素来综合反映^[12]。因此, 本文主要选取断裂活动性、地震活动性、地形变特征、地球物理场、地应力特征等 5 种因素作为研究区内模糊综合稳定性评价的二级因素集 U 。

$$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\} = \{\text{断裂活动性, 地震活动性, 地应变特征, 地球物理场, 地应力特征}\},$$

其中, 对于 u_1 , 主要选取主要断裂的活动时代、主要断裂的切割深度、次级活动断裂的分布密度这 3 个影响因素作为次一级的评价因子, 即

$$u_1 = \{u_{11}, u_{12}, u_{13}\} = \{\text{主要断裂活动时代, 主要断裂的切割深度, 次级断裂分布密度}\};$$

对于 u_2 , 主要选取地震烈度, 地震峰值加速度这两个影响因素作为次一级的评价因子, 即:

$$u_2 = \{u_{21}, u_{22}\} = \{\text{地震烈度, 地震峰值加速度}\};$$

对于 u_3 , 选取垂直形变和水平形变作为次一级的评价因子, 即

$$u_3 = \{u_{31}, u_{32}\} = \{\text{垂直形变, 水平形变}\};$$

对于 u_4 , 则选取重力异常梯度和磁异常梯度作为次一级的评价因子, 即

$$u_4 = \{u_{41}, u_{42}\} = \{\text{重力异常梯度, 磁异常梯度}\};$$

对于 u_5 , 主要选取最大主应力值和主应力与断裂夹角作为次一级的评价因子,

$$u_5 = \{u_{51}, u_{52}\} = \{\text{最大主应力值, 主应力与断裂夹角}\}.$$

而本文对地壳稳定性划分为稳定、较稳定、较不稳定、不稳定四个等级, 即评价集为 $V = \{\text{稳定, 较稳定, 较不稳定, 不稳定}\}$ 。

2.3 评价指标隶属度的确定

本文采用专家经验法确定研究区内各个评价指标的打分标准, 而后根据对各评价指标的评价结果确定其隶属度函数。其中对于评价结果为“稳定”的, 其隶属度函数为 $R = (1, 0, 0, 0)$; 对于评价

结果为“较稳定”的,其隶属度函数取 $R = (0,1,0,0)$;同理,对于评价结果为“较不稳定”和“不稳定”的,其隶属度函数则分别为 $R = (0,0,1,0)$ 和 $R = (0,0,0,1)$ 。

1) 对断裂活动性指标的评价

考虑到断裂为线状物,若仅考虑断裂穿越的评分单元是不合适的,因此将主要断裂周边 15 km 均划为断裂的影响区域,对主要断裂的活动时代和切割深度进行评分,评分标准见表 2,对其进行评分后的分级标准为稳定(0 ~ 2.5 分),较稳定(2.5 ~ 5 分),较不稳定(5 ~ 7.5 分),不稳定(7.5 ~ 10 分)。

而对次级断裂分布密度的评分,由于次级断裂影响较小,因此仅考虑次级断裂穿越的评价单元的情况,而不考虑其对周边单元格的影响,评价标准为:稳定(0 条/单元格),较稳定(1 条/单元格),较不稳定(2 条/单元格),不稳定(>2 条/单元格)。

表 2 主要断裂活动时代及切割深度评分标准
Table 2 Assessment criteria of the activity age and cutting depth of major faults

主要断裂次级评价因子	分级指标	评价分值		
		5 km	10 km	15 km
主要断裂活动时代	前第四纪	3	1.5	0.6
	早-中更新世	5	2.5	1.0
	晚更新世	7	3.5	1.4
	全新世	10	5.0	2.0
主要断裂切割深度	盖层断裂	3	1.5	0.6
	基底断裂	5	2.5	1.0
	地壳断裂	7	3.5	1.4
	岩石圈断裂	10	5.0	2.0

2) 对地震活动性指标的评价

对于地震活动性指标,参考国家有关抗震设防标准和有关专家意见后,将研究区内地震烈度的分级标准划分为稳定(VI级),较稳定(VII级),较不稳定(VIII级),不稳定(IX级);而地震的峰值加速度则划分如下:稳定(<0.09 g),较稳定(0.09 g ~ 0.19 g),较不稳定(0.19 g ~ 0.38 g),不稳定(>0.38 g)。

3) 地形变特征和地球物理场的分级标准

采用 arcgis 自然间断点分级法,将这两个指标分为稳定、较稳定、较不稳定和不稳定四个级别,自然间断点分级法基于从数据中继承的自然分组,对分类间隔加以识别,可对相似值进行最恰当地分组,并可使各个类之间的差异最大化。其原理如下:(i) 指定对一系列数据 X 中的分组数 K ;(ii) 在 $[\min(X), \max(X)]$ 这一范围中创建 $K - 1$ 个均匀或是随机的值,将这些值作为初始的分类边界;(iii) 计算每一

个初始分类中的平均值和均方差的和,并记录总的均方差和(TSSD);(iv) 对每一个分类中的值进行类别的调整,看能否使得 TSSD 减小,这样不断迭代,最终使得 TSSD 最小时分类完成。

4) 地应力特征的分级标准

对研究区地应力值的有限元模拟后得到的最大主应力结果,可以看做是对地表以下 1 km 深度的最大主应力值,而根据已有研究^[27],在渤海海峡当最大主应力与最小主应力值之比即

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = (\sqrt{1 + \mu^2} + \mu)^2$$

时,岩体处于临界破坏状态, σ_1 继续增大,那么岩体将会被破坏。而研究区内最小主应力值即为重力值,研究区内岩体密度取 2300 kg m^{-3} , $\mu = 0.4$,故最小主应力的平均值 $\sigma_3 = 23 \text{ MPa}$,则临界的最大主应力 $\sigma_1 = 50.14 \text{ MPa}$,因此将这一数值作为不稳定的界限,而其他三个等级则等间距取值,即稳定(<42 MPa)、较稳定(42 ~ 46 MPa)、较不稳定(46 ~ 50 MPa)、不稳定(>50 MPa)。

对于最大主应力与断裂之间的夹角的分级,则划分如下:稳定(无断裂,或与断裂角度接近 90°)、较稳定(最大主应力与断裂夹角小于 40° 或大于 50°)、较不稳定(最大主应力与断裂夹角在 $40^\circ \sim 50^\circ$ 之间)、不稳定(最大主应力与共轭断裂相交)。

2.4 各评价指标权重的确定

利用上文所述的“1 ~ 9 标度法”对各影响因素进行两两比较,构造出判断矩阵 D^m ,其中 m 为阶梯结构的层数;其中第一层的次级因素为断裂活动性(u_1)、地震活动性(u_2)、地形变特征(u_3)、地球物理场(u_4)、地应力特征(u_5)等 5 种,利用“1 ~ 9 标度法”构造出的判断矩阵 D^1 如下:

$$D^1 = \begin{matrix} & \begin{matrix} u_1 & u_2 & u_3 & u_4 & u_5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 7 & 6 & 5 \\ 1 & 1 & 7 & 6 & 5 \\ 1/7 & 1/7 & 1 & 1/4 & 1/3 \\ 1/6 & 1/6 & 4 & 1 & 1/2 \\ 1/5 & 1/5 & 3 & 2 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}。$$

求得这一矩阵的特征向量并进行归一化处理得到其二级因素集中的权重值为:

$$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\} = \{\text{断裂活动性, 地震活动性, 地应变特征, 地球物理场, 地应力特征}\}, \\ \omega^1 = (0.3897, 0.3897, 0.0390, 0.0796, 0.1020)。$$

同理,对第二层的次级因素构造出判断矩阵如下:

$$D_1^2 = \begin{matrix} & u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ \begin{matrix} u_{11} \\ u_{12} \\ u_{13} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 7 & 5 \\ 1/7 & 1 & 1/3 \\ 1/5 & 3 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix},$$

$$D_2^2 = \begin{matrix} & u_{21} & u_{22} \\ \begin{matrix} u_{21} \\ u_{22} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1/3 \\ 3 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix},$$

$$D_3^2 = \begin{matrix} & u_{31} & u_{32} \\ \begin{matrix} u_{31} \\ u_{32} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix},$$

$$D_4^2 = \begin{matrix} & u_{41} & u_{42} \\ \begin{matrix} u_{41} \\ u_{42} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix},$$

$$D_5^2 = \begin{matrix} & u_{51} & u_{52} \\ \begin{matrix} u_{51} \\ u_{52} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

对这些矩阵进行求解,得出其特征向量并归一化后求得其各自的权重如下:对于断裂活动性来说,其次级影响因素{主要断裂的活动时代,主要断裂的切割深度,次级断裂的分布密度}的相对权重为

$$\omega_1^2 = (0.7306, 0.0810, 0.1884);$$

对于地震活动性来说,其次级影响因素{地震烈度,最大峰值加速度}的相对权重为

$$\omega_2^2 = (0.25, 0.75);$$

对于地形变特征来说,其次级影响因素{垂直形变,水平形变}的相对权重为

$$\omega_3^2 = (0.33, 0.67);$$

对于地球物理场来说,其次级影响因素{重力异常梯度,磁力异常梯度}的相对权重为

$$\omega_4^2 = (0.5, 0.5);$$

对于地应力特征来说,其次级影响因素{最大主应力值,最大主应力与断裂夹角}的相对权重为

$$\omega_5^2 = (0.25, 0.75).$$

2.5 渤海海峡跨海通道区域地壳稳定性评价

本文在进行研究区区域地壳稳定性综合评价时,采用加权平均法进行计算,这种方法综合考虑了所有评价因素的影响,能够得出相对较为准确的结

果。在对评价指标的隶属度函数的确定方面,本文主要应用专家打分法进行打分和分级,从而给出隶属度函数。以研究区中 ID 号为 1 的评价单元为例,主要断裂活动时代、主要断裂切割深度、次级断裂分布密度这三个影响因素相对评价集 V 的隶属度函数分别为:

$$V = \{\text{稳定, 较稳定, 较不稳定, 不稳定}\},$$

$$R_{11} = (0, 1, 0, 0), R_{12} = (0, 1, 0, 0),$$

$$R_{13} = (1, 0, 0, 0).$$

则隶属度矩阵可以表示为

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

采用加权平均法,可以算出这一评价单元相对断裂活动性这一因素的稳定性隶属度为

$$B_1 = \omega_1^2 \circ R = (0.1884, 0.8116, 0, 0).$$

同理,可以求得 B_2, B_3, B_4, B_5 , 并构成一级模糊评判矩阵

$$B' = \begin{bmatrix} 0.1884 & 0.8116 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0.3300 & 0 & 0 & 0.6700 \\ 0.5000 & 0 & 0.5000 & 0 \\ 0.2500 & 0 & 0.7500 & 0 \end{bmatrix}.$$

而前文已经求得 $\omega^1 = (0.3897, 0.3897, 0.0390, 0.0796, 0.1020)$, 那么根据 B' 和 ω^1 就可以得出该评价单元的二级评价结果

$B = \omega^1 \circ B' = (0.1516, 0.3163, 0.5060, 0.0261)$, 根据最大隶属度准则,这一评价单元相对于区域地壳稳定性的评价等级为“较不稳定”。

按照以上方法计算出全部 1600 个评价单元,结果如图 6。可以发现研究区内稳定区和较稳定区较少,分别为 204 和 141,主要集中在研究区右上角北黄海区域;而研究区大部分区域处于较不稳定和不稳定状态,其数量分别为 775 和 480,其中不稳定区域明显受到 NNE 向郯庐断裂和 NW 向张家口蓬莱断裂的影响,故而主要集中在研究区南部的渤海湾盆地和渤海海峡南部海域中,研究区这种大面积的较不稳定和不稳定与该区域的地震活动也有很大关系,对处于规划中的渤海海峡跨海通道是一种极为不利的情况,需要在以后的调查和研究中加以重视。

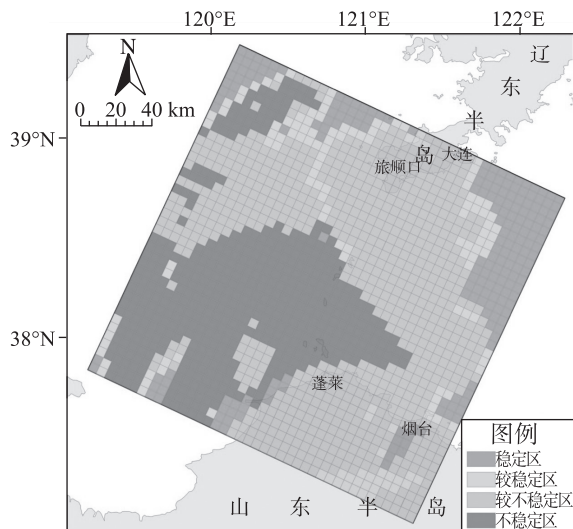


图6 研究区区域地壳稳定性模糊综合评价结果

Fig. 6 Results of crustal stability fuzzy comprehensive evaluation in the researched area

3 结论

本文通过层次分析法对渤海海峡跨海通道工程区进行了区域地壳稳定性的多因子模糊综合评价,按照稳定、较稳定、较不稳定、不稳定四个级别对研究区1600个评价单元进行了稳定性划分,发现研究区大部分处于较不稳定和不稳定区,尤其南部渤海湾盆地和渤海海峡南部区域,几乎均处于不稳定区域;此外,渤海海峡北部则均处于较不稳定区域,即整个渤海海峡区域均处于较不稳定和不稳定区域。研究结果对渤海海峡跨海通道将来的具体规划和建设是极为不利的,建议在进一步规划或建设跨海通道工程时采取更加详细的工程地质调查手段,尽可能避开可能对工程建设和运营产生强烈危害的区域,若无法避开,则需有针对性的采取应对措施。此外,断裂和地震活动性是对研究区区域地壳稳定性影响最大的两个因素,在开展进一步调查研究或是工程设计时应该重点考虑针对两个因素的防御措施。

参考文献

[1] 谷德振. 中国工程地质学的发展. 水文地质工程地质, 1982(4): 56-59. Gu D Z. The development of engineering geology in China. Hydrogeology and Engineering Geology, 1982(4): 56-59

[2] 谭成轩, 孙叶, 吴树仁, 等. “5.12”汶川ms8.0大地震后关于我国区域地壳稳定性评价的思考. 地质力学学报, 2009, 15(2): 142-150. Tan C X, Sun Y, Wu S R, et al. A considera-

tion on regional crustal stability assessment after ms 8.0 Wenchuan strong earthquake in China. Journal of Geomechanics, 2009, 15(2): 142-150

[3] 胡海涛. “安全岛”——相对稳定地(岩)块在广东核电站选址中的初步应用. 工程勘察, 1983(4): 25-29. Hu H T. “Safety Island”—Preliminary application relatively stable (rock) block siting of nuclear power plants in Guangdong. Geotechnical Investigation and Surveying, 1983(4): 25-29

[4] 殷跃平. 区域地壳稳定性评价专家系统(CRUSTAB). 北京: 中国地质科学院, 1990. Yin Y P. Expert system(CRUSTAB) of regional crustal stability evaluation. Beijing: Chinese Academy of Geosciences, 1990

[5] 刘传正. 重大工程选址的“安全岛”多级逼近与优选理论. 中国地质灾害与防治学报, 1993(1): 28-37. Liu C Z. The theory of optimization and multilevel approach on “Safety Island” for key engineering location selection. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1993(1): 28-37

[6] 罗国煜, 刘松玉, 杨卫东. 区域稳定性优势面分析理论与方法. 岩土工程学报, 1992, 14(16): 10-18. Luo G Y, Liu S Y, Yang W D. Analysis of regional stability by theory of preferred plane. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(16): 10-18

[7] 孙叶, 谭成轩, 杨贵生, 等. 中国区域地壳稳定性量化评价与分区. 地质力学学报, 1997, 9(3): 42-52. Sun Y, Tan C X, Yang G S, et al. Quantitative assessment and zonation of regional crustal stability in China. Journal of Geomechanics, 1997, 9(3): 42-52

[8] 汪明武, 罗国煜, 章杨松. 区域稳定性智能评价与控制系统的研究. 地质评论, 2000, 46: 212-217. Wang M W, Luo G Y, Zhang Y S. Intelligent system of assessment and control for regional stability. Geological Review, 2000, 46: 212-217

[9] 彭建兵. 区域稳定动力学研究(一)——基本原则. 工程地质学报, 2001, 9(1): 3-11. Peng J B. Fundamental principles for study on dynamics of regional stability. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(1): 3-11

[10] 彭建兵. 区域稳定动力学研究(二)——基本原则. 工程地质学报, 2001, 9(1): 12-16. Peng J B. Fundamental principles for study on dynamics of regional stability. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(1): 12-16

[11] 唐辉明, 李德威, 胡新丽. 龙山门断裂带活动特征与工程区域地壳稳定性评价理论. 工程地质学报, 2009, 17(2): 145-152. Tang H M, Li D W, Hu X L. Faulting characteristics of Wenchuan earthquake and evaluation theory of regional crustal stability for engineering. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(2): 145-152

[12] 姚鑫, 李凌婧, 张永双, 等. 青藏高原东缘区域地壳稳定性评价. 地质通报, 2015, 34(1): 32-44. Yao X, Li L J, Zhang Y S, et al. Development and problems of regional crustal stability assessment study companying with discussion of the specification compilation. Geological Review, 2015, 34(1): 32-44

[13] 姚鑫. 区域地壳稳定性评价研究进展与问题兼谈规范编制.

- 地质论评, 2014, 60(1): 22-30. Yao X. Regional crustal stability assessment of the eastern margin of Tibetan Plateau. Geological Bulletin of China, 2014, 60(1): 22-30
- [14] 柴建峰, 朱时杰, 伍法权, 等. 区域地壳稳定性研究现状与趋势. 工程地质学报, 2001, 12(4): 401-407. Chai J F, Zhu S J, Wu F Q, et al. State of art: Regional crustal stability. Journal of Engineering Geology, 2001, 12(4): 401-407
- [15] 丁东. 渤海海峡跨海通道的地质概况. 海洋地质动态, 1994(3): 5-7. Ding D. Geology generalization of passage for trans Bohai strait. Ocean Geology Trends, 1994(3): 5-7
- [16] 宋克志. 渤海海峡跨海通道桥隧方案比选研究. 中国工程科学, 2013, 12: 52-60. Song K Z. Study on scheme comparison of bridge and tunnel for Bohai Strait cross-sea channel. Engineering Science, 2013, 12: 52-60
- [17] 王梦恕, 宋克志. 渤海湾跨海通道建设的紧迫性及现实条件和初步方案. 北京交通大学学报, 2013, 37(1): 1-10. Wang M S, Song K Z. Urgency and current construction conditions and preliminary scheme of Bohai Strait cross-sea channel. Journal of Beijing Jiaotong University, 2013, 37(1): 1-10
- [18] 李三忠, 周立宏, 刘建忠, 等. 华北板块东部新生代断裂构造特征与盆地成因. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(3): 57-66. Li S Z, Zhou L H, Liu J Z, et al. Cenozoic faulting and basin formation in the eastern north China plate. Marine Geology and Quaternary Geology, 2004, 24(3): 57-66
- [19] 刘春成, 戴福贵, 杨津, 等. 渤海湾盆地海域古近系一新近系地质结构和构造样式地震解释. 中国地质, 2010, 37(6): 1545-1558. Liu C C, Dai F G, Yang J, et al. Seismic interpretation of Eocene-Neogene geological structures and tectonic styles in the sea area of Bohai gulf basin. Geology in China, 2010, 37(6): 1545-1558
- [20] 李洪奎, 杨永波, 耿科, 等. 华北陆块区渤海陆块山东部分的厘定及其地质意义. 地质调查与研究, 2013, 36(3): 173-180. Li H K, Yang Y B, Geng K, et al. Subdivision of the Bohai landmass from the North China block and its implications. Geological Survey and Research, 2013, 36(3): 173-180
- [21] 应绍奋, 沈永坚, 郭良迁. 渤海沿岸地区的现代构造运动. 中国地震, 1986, 2(1): 35-41. Yin S F, Shen Y J, Guo L Q. Recent tectonic movements in the coastal area of the Bohai Sea. Earthquake Research in China, 1986, 2(1): 35-41
- [22] 刘忠亚, 彭轩明, 赵铁虎, 等. 渤海海峡及邻区活动断裂分布及其活动特征. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(1): 87-97. Liu Z Y, Peng X M, Zhao T H, et al. The distribution and activity features of active faults in the Bohai Strait and its adjacent areas. Marine Geology and Quaternary Geology, 2016, 36(1): 87-97
- [23] 彭艳菊, 吕悦军, 徐杰, 等. 渤海地区地震危险性特征及对工程抗震设防的启示. 地球物理学进展, 2012, 27(1): 18-28. Peng Y J, Lv Y J, Xu J, et al. Seismic risk zoning in Bohai and its inspiration to engineering earthquake resistance. Progress in Geophys, 2012, 27(1): 18-28
- [24] 吴波. 环渤海地区地壳形变特征研究. 北京: 中国测绘科学研究院, 2015. Wu B. Research on the characteristics of crustal deformation in Bohai rim region. Beijing: Chinese Academy of Surveying and Mapping, 2015
- [25] Saaty T L. The analytic hierarchy process. New York: McGraw-Hill Book Company, 1980
- [26] Zadeh L A. Fuzzy sets. Information and Control, 1965, 8: 338-353
- [27] 郑红霞, 张训华, 赵铁虎, 等. 渤海海峡地应力场研究及地质条件评价. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(11): 81-91. Zheng H X, Zhang X H, Zhao T H, et al. In-situ stress field and geological analysis of Bohai Strait. Periodical of Ocean University of China(Natural Science Edition), 2015, 45(11): 81-91

THE REGIONAL CRUSTAL STABILITY EVALUATION OF BOHAI STRAIT

Liu Zhongya^{1,2} Zhao Tiehu² Peng Xuanming³

(1 Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

(2 Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao, Shandong 266071, China)

(3 Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Langfang, Hebei 065000, China)

Abstract In China, the Regional Crustal Stability Evaluation is mainly used as an important reference to engineering decision-making and planning. This subject is an engineering geology branch that developed independently in China. It has experienced more than 50 years since its formation and maturity, and has been widely used in constructing large-scale projects. The applications of this method include the selection of nuclear power stations, the decision-making and location of dams, the construction of bridges, the planning of cities, the selection of railway and tunnels and so on. Some of the famous projects include Guangdong Nuclear Power Station, the Three Gorges Dam, urban planning of Xi'an and Tianjin, the Qinghai-Tibet Railway, Qinling Tunnel construction and so on. The contents of regional crustal stability evaluation include the internal and external geological actions and the influence of medium condi-

tions, in which the internal geologic action is the main research object. In recent years, with the expansion of engineering activities, the new requirements for regional crustal stability evaluation are also proposed: first, this method need to be closer to engineering practice, and change from site evaluation to geological engineering design; second, the evaluation area has extends from land to sea. This paper is an attempt to evaluate the regional crustal stability of the sea area; as the economic development of China, the Bohai Sea has become a major factor restricting the development of surrounding areas, so the voices of construction the Bohai Strait Sea-crossing Tunnel are increasingly high. This paper focuses on the evaluation of the regional crustal stability in the Bohai Strait Sea-crossing Tunnel Project area by using the method of fuzzy mathematical evaluation. The indexes to evaluate the crustal stability of the study area in this paper are fault activity, seismic activity, ground deformation characteristics, stress characteristics and ground geophysical field characteristics. These indexes data are obtained from the newest GPS data, gravity and magnetic data, high-resolution seismic data and crustal stress data of this area. In this evaluation, the crustal stability of Bohai strait Sea-crossing tunnel project area has been divided into four levels: very stable, stable, unstable and very unstable. In the evaluation process, divide the research area into $1600\ 5 \times 5$ km evaluation areas. The evaluation results show that the most of the evaluation areas are unstable and very unstable, and the number of very stable and stable areas is relatively small: the number of very stable, stable evaluation area is 204 and 141, and mainly in the northern Yellow Sea region; the number of unstable and very unstable evaluation area is 775 and 480, and mainly in the southern Bohai Sea and southern Bohai Strait. This result is obviously due to the influence of Tanlu fault and Zhangjiakou-Penglai fault. This evaluation results are unfavorable for the planning and construction of the Bohai Strait Sea-crossing Tunnel and it is necessary to strengthen the study of this area.

Key words Bohai Strait; Regional crustal stability; Fault activity; Seismic activity; Fuzzy mathematical evaluation